

*TNO-rapport*  
PML 1998-A107

**Modellering bescherming NBC-kleding**  
**1 Stromingsprofiel tussen kleding en huid**

TNO Prins Maurits Laboratorium

**DISTRIBUTION STATEMENT A**  
Approved for Public Release  
Distribution Unlimited



19990907 033

TNO-rapport  
PML 1998-A107

## Modellering bescherming NBC-kleding 1 Stromingsprofiel tussen kleding en huid

TNO Prins Maurits Laboratorium

Lange Kleiweg 137  
Postbus 45  
2280 AA Rijswijk

Telefoon 015 284 28 42  
Fax 015 284 39 63

Datum  
juni 1999

Auteur(s)  
Dr. ir. P. Brasser  
Ir. J. Kaaijk

Rubricering  
Vastgesteld door : Ing. J.M. de Koning  
Vastgesteld d.d. : 4 mei 1999  
(De rubricering wijzigt niet)

Titel : Ongerubriceerd  
Managementuitreksel : Ongerubriceerd  
Samenvatting : Ongerubriceerd  
Rapporttekst : Ongerubriceerd  
Bijlagen A - F : Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk, foto-  
kopie, microfilm of op welke andere  
wijze dan ook, zonder voorafgaande  
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor Onder-  
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel  
de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct belang-  
hebbenden is toegestaan.

Exemplaar nr. : 11  
Oplage : 21  
Aantal pagina's : 39 (incl. bijlagen,  
excl. RDP & distributielijst)  
Aantal bijlagen : 6

© 1999 TNO

DTIC QUALITY INSPECTED 4

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel  
van de hoofdgroep TNO Defensieonderzoek  
waartoe verder behoren:

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium  
TNO Technische Menskunde

**DISTRIBUTION STATEMENT A**  
Approved for Public Release  
Distribution Unlimited



AQF99-12-2227

Nederlandse Organisatie voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

## Managementuittreksel

Titel : Modelleringsbescherms NBC-kleding  
1 Stromingsprofiel tussen kleding en huid  
Auteur(s) : Dr. ir. P. Brasser en Ir. J. Kaaijk  
Datum : juni 1999  
Opdrachtnr. : B93KL458  
Rapportnr. : PML 1998-A107

Er zijn diverse experimentele methoden op het TNO Prins Maurits Laboratorium (TNO-PML) beschikbaar om de bescherming van NBC-kleding tegen de blootstelling aan chemische strijdmiddelen te evalueren. Om meer inzicht te verkrijgen in de processen die de beschermende werking van NBC-kleding bepalen, wordt, naast de experimentele toetsing, gewerkt aan de modellering van de bescherming. Na ontwikkeling van zo'n model kan dit worden toegepast bij de evaluatie van nieuwe NBC-kleding en kan het bijdragen in de keuze van zo goed mogelijk beschermende kleding met zo gering mogelijke fysiologische belasting. Bovendien kan het worden gebruikt bij de ontwikkeling en verbetering van testsystemen voor NBC-beschermende kleding.

Om tot een volledige modellering van de bescherming van een compleet kledingstelsel te komen, moeten de volgende processen beschreven worden:

- het luchtstromingsprofiel om, door en onder de kleding;
- de penetratie van het chemisch strijdmiddel door het kledingmateriaal;
- het concentratieprofiel onder de kleding en het damptransport naar de huid.

In eerder onderzoek is een model ontwikkeld, dat de penetratie van toxische stoffen door NBC-kledingmateriaal voorspelt. In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van een model voor het luchtstromingsprofiel om, door en onder de kleding. Een lichaamsdeel wordt hierbij gekarakteriseerd door een cilinder, die op een bepaalde afstand door kledingmateriaal is omspannen. Voor het berekenen van de luchtsnelheid door de kleding moet het drukprofiel om de kleding bekend zijn. Bij het opstellen van dit model is uitgegaan van een drukprofiel dat in de literatuur gegeven wordt. De resultaten van het model werden vergeleken met die van een empirische formule die wordt gebruikt bij de damptesten van NBC-beschermende kledingmaterialen. Bij de experimentele condities waarbij de empirische formule werd bepaald, bleken de resultaten een goede overeenkomst te vertonen. Door middel van een parameterstudie werd de invloed van diverse parameters in het model onderzocht. Indien de dikte van de luchtlaag onder de kleding afneemt, of de diameter van de cilinder toeneemt, kan dit leiden tot een afname van de luchtsnelheid door het kledingmateriaal. De grootste effecten worden gevonden bij materialen met een lage luchtweerstand.

Ter verbetering van het model, zullen drukprofielen om cilinders met kleding gemeten worden of numeriek worden berekend.

Het model zal als uitgangspunt dienen voor het modelleren van het concentratieprofiel onder de kleding en het damptransport naar de huid. De resultaten hiervan zullen worden vergeleken met de experimentele studie die in het kader van het project 'evaluatie kledingtesten' wordt uitgevoerd (A97KL423).

## Samenvatting

Er is een model ontwikkeld dat de luchtstroming om, door en onder NBC-beschermende kleding berekent. Een lichaamsdeel wordt hierbij gekarakteriseerd door een cilinder, die op een bepaalde afstand door het kledingmateriaal is omspannen. Om het stromingsprofiel te berekenen moet het drukprofiel om de kleding bekend zijn. In dit rapport is uitgegaan van een drukprofiel dat in de literatuur gegeven wordt. De resultaten van het model werden vergeleken met die van een empirische formule die wordt gebruikt bij de damptesten van NBC-beschermende kledingmaterialen. Bij de experimentele condities waarbij de empirische formule werd bepaald, bleken de resultaten een goede overeenkomst te vertonen. Door middel van een parameterstudie werd de invloed van diverse parameters in het model onderzocht. Indien de dikte van de luchtlaag onder de kleding afneemt, of de diameter van de cilinder toeneemt, kan dit leiden tot een afname van de luchtsnelheid door het kledingmateriaal. De grootste effecten worden gevonden bij materialen met een lage luchtweerstand.

## Inhoud

Managementuittreksel .....	2
Samenvatting .....	4
Symbolenlijst .....	6
1 Inleiding .....	7
2 Theorie .....	8
2.1 Procesbeschrijving .....	8
2.2 Turbulentie criteria .....	9
2.3 Het snelheidsprofiel om, door en onder de kleding .....	9
2.4 Empirische relatie voor het berekenen van de luchtsnelheid .....	12
3 Berekeningen .....	13
3.1 Experimentele omstandigheden .....	13
3.2 Luchtsnelheid .....	13
3.3 Parameterstudie .....	18
4 Conclusies .....	24
5 Literatuur .....	25
6 Ondertekening .....	27
Bijlagen:	
A Het drukprofiel om een cilinder bij laminaire stroming	
B Luchtsnelheid door kledingmateriaal	
C Het snelheidsprofiel onder kledingmateriaal	
D Analytische oplossing van de luchtsnelheid; laminaire stroming	
E Analytische oplossing van de luchtsnelheid; turbulente stroming	
F Parameteranalyse	

## Symbolenlijst

### Romaans

$g$	Valversnelling	(m/s <sup>2</sup> )
$h$	Hoogte	(m)
$K$	Constante	(-)
$K_b$	Berekende constante	(mmH <sub>2</sub> O/(cm/s)/(m/s))
$K_e$	Empirische constante	(mmH <sub>2</sub> O/(cm/s)/(m/s))
$L$	Lengte van de cilinder	(m)
$P_0$	Druk ver van de cilinder	(Pa)
$P_{in}$	Druk in de luchtlaag onder het kledingmateriaal	(Pa)
$P_{uit}$	Druk buiten het kledingmateriaal	(Pa)
$R$	Straal van de cilinder	(m)
$Re$	Reynolds-getal	(-)
$\Delta R$	Halve dikte van de luchtlaag tussen wand en kledingmateriaal	(m)
$R_{mat}$	Luchtweerstand van het kledingmateriaal	(mmH <sub>2</sub> O/(cm/s))
$v_0$	Windsnelheid	(m/s)
$v_{mat}$	Luchtsnelheid door het kledingmateriaal	(m/s)
$x$	Plaats langs de cilinder ten opzichte van het stagnatiepunt	(m)

### Grieks

$\Gamma$	Luchtpermeabiliteit	(m/(Pa s))
$\phi_v$	Debiet in de luchtlaag	(m <sup>3</sup> /s)
$\eta$	Dynamische viscositeit	(kg/(m s))
$\theta$	Hoek ten opzichte van de windrichting	(°)
$\rho_l$	Dichtheid lucht	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	Dichtheid water	(kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	Schuifspanning	(Pa)

## 1 Inleiding

In eerder onderzoek is een model opgesteld, dat de penetratie van damp door NBC-beschermend kledingmateriaal beschrijft [1-4]. Om tot een volledige modellering van de bescherming van een totaal kledingsysteem te komen, moeten de volgende processen beschreven worden:

- 1 luchtstromingsprofiel om, door en onder de kleding;
- 2 damppenetratie door het kledingmateriaal;
- 3 damptransport naar de huid.

In de literatuur wordt een fysisch model beschreven voor processen die de penetratie en de huiddepositie van aerosolen door permeabele kledingsystemen bepalen [5]. Het lichaam(sdeel) wordt hierbij gekarakteriseerd door een cilinder die op een bepaalde afstand door kledingmateriaal is omspannen. Met behulp van dit model kan de luchtstroming door het materiaal, de penetratie van het aerosol door het materiaal, en de depositie van het aerosol op het cilinderoppervlak worden berekend.

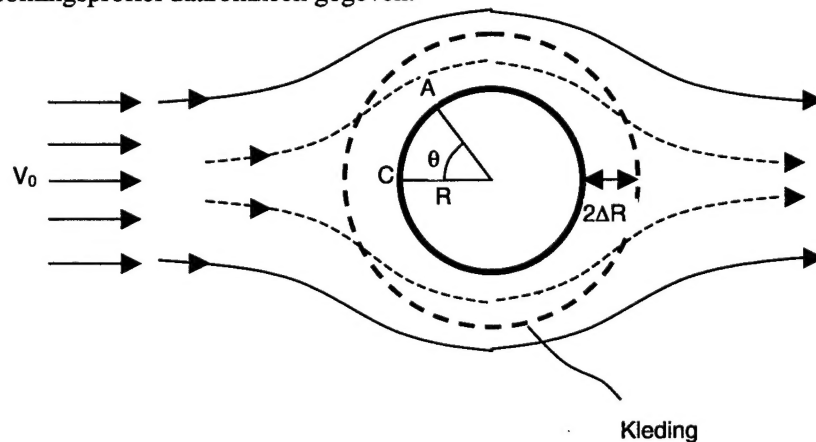
Voor de modellering van de dampbescherming van NBC-kleding is voor een dergelijke opzet gekozen. Allereerst is een model ontwikkeld dat het luchtstromingsprofiel om, door en onder de kleding beschrijft (1). In combinatie met het model voor de penetratie van damp door het kledingmateriaal (2) en het nog te ontwikkelen model voor het damptransport naar de huid (3), kan dit leiden tot een model voor de bescherming die door een compleet kledingsysteem geboden wordt. In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van het model voor het luchtstromingsprofiel om, door en onder de kleding. Tevens worden de resultaten gegeven van een parameterstudie, waarbij de invloed van de diameter van de cilinder, de afstand tussen de kleding en het cilinderoppervlak, en de luchtweerstand van het kledingmateriaal op het stromingsprofiel werd bepaald.



## 2 Theorie

### 2.1 Procesbeschrijving

De luchtsnelheid door het kledingmateriaal is afhankelijk van de aanstroomrichting van de wind. Aan de voorkant van het lichaamsdeel zal de lucht naar binnen stromen en aan de achterkant zal de lucht weer naar buiten stromen. In principe is op elke plaats de luchtsnelheid door het kledingmateriaal anders. Het is mogelijk deze stroming te modelleren door aan te nemen dat het desbetreffende lichaamsdeel een cilinder is [5]. In figuur 1 is een schematische weergave van deze cilinder met het stromingsprofiel daaromheen gegeven.



*Figuur 1: Het stromingsprofiel van lucht om een cilinder, bekleed met kledingmateriaal.*

De cilinder is bekleed met kledingmateriaal. Dit kledingmateriaal zit op een bepaalde gedefinieerde afstand van de cilinder ( $2\Delta R$ ), zodat er een luchtlaag tussen het kledingmateriaal en de cilinder zit. Op punt C raakt de luchtstroom de kleding loodrecht. Dit punt wordt het stagnatiepunt genoemd. Op andere plaatsen (A), onder een hoek  $\theta$  ten opzichte van het stagnatiepunt, zal de luchtstroom de kleding niet loodrecht raken. Als gevolg hiervan zal op elke plek om de kleding heen een andere buitendruk heersen. Deze buitendruk moet bekend zijn om het totale stromingsprofiel te berekenen.

Ook de druk onder de kleding zal afhankelijk zijn van de plaats. Als gevolg van deze plaatsafhankelijkheid zal lucht in de luchtlaag tussen het kledingmateriaal en de cilinder door stromen. Deze stroming is te benaderen als luchtstroming tussen twee platen door.

Omdat de druk onder de kleding en buiten de kleding niet gelijk is, zal ook lucht door het doek gaan stromen. Deze luchtstroom is te berekenen als beide drukken bekend zijn.

## 2.2 Turbulentie criteria

Het stromingsprofiel om een cilinder met kledingmateriaal is sterk afhankelijk van de mate van turbulentie. Turbulentie is te beschrijven als de verhouding tussen de convectieve kracht (impuls) en de viscositeit (traagheid). Een bepaald medium, bijvoorbeeld lucht, heeft een dichtheid  $\rho$ . Dit medium stroomt met een bepaalde snelheid,  $v$ , tegen een bolletje of een cilinder met een straal,  $R$ , aan. Als gevolg van deze aanstroming zullen wervels kunnen ontstaan in de lucht achter de cilinder. Deze wervels zullen echter minder optreden, als de viscositeit van het medium,  $\eta$ , hoger is. In de praktijk is gebleken, dat de verhouding tussen deze vier variabelen een goede maat vormt voor turbulentie:

$$Re = \frac{2\rho v R}{\eta} \quad (1)$$

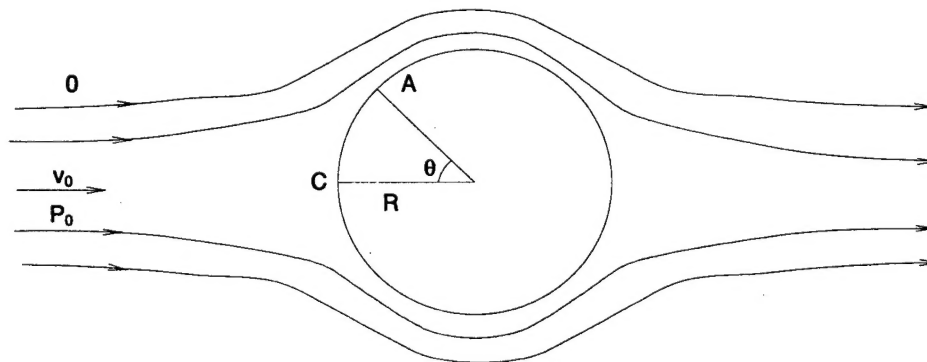
Deze verhouding wordt het kengetal van Reynolds ( $Re$ ) genoemd. Als  $Re$  laag is, heet de stroming laminair. Wordt  $Re$  hoger dan 2000 à 2400, dan zal de stroming turbulent worden en zullen er wervelingen gaan plaatsvinden.

## 2.3 Het snelheidsprofiel om, door en onder de kleding

### 2.3.1 De luchtsnelheid om de kleding

Voor het berekenen van de luchtsnelheid door de kleding, moet het drukprofiel buiten de cilinder, bedekt met kleding, bekend zijn. Dat drukprofiel is afhankelijk van de mate van turbulentie om de kleding.

In het laminaire geval, zal de stroming er uitzien, zoals weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Stromingsprofiel van een gasstroom om een cilinder bij lage Reynolds.

Het drukprofiel om een cilinder is bekend indien de luchtstroom laminair is. In dat geval kan dit profiel analytisch berekend worden (bijlage A). Het resultaat is:

$$P_{uit,\theta} = P_0 + \frac{1}{2} \rho_l v_0^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (2)$$

Waarbij  $P_{uit,\theta}$  de plaatselijke druk is op een plaats, die een hoek  $\theta$  verwijderd is van het stagnatiepunt (punt C in figuur 2). Deze druk is afhankelijk van de buiten-druk voor de cilinder,  $P_0$ , de windsnelheid,  $v_0$ , en de dichtheid van de lucht,  $\rho_l$ .

Indien de stroming om de cilinder turbulent is, zullen wervels achter de cilinder ontstaan. De druk om de cilinder is dan niet te berekenen en dient experimenteel te worden bepaald.

### 2.3.2 De luchtsnelheid door de kleding

Als gevolg van het drukverschil,  $\Delta P$ , tussen de plaatselijke druk buiten het kledingmateriaal en de druk in de luchtlaag tussen het kledingmateriaal en de cilinder, zal de lucht door het kledingmateriaal heen kunnen stromen. In bijlage B is afgeleid, dat de snelheid waarmee de lucht door het kledingmateriaal stroomt,  $v_{mat}$ , berekend kan worden met:

$$v_{mat} = \frac{10 \Delta P}{R_{mat} \rho_w g} \quad (3)$$

Waarbij  $R_{mat}$  de luchtweerstand van het kledingmateriaal is,  $\rho_w$  de dichtheid van water en  $g$  de valversnelling. Om deze snelheid te berekenen moeten dus zowel de druk buiten de kleding als de druk onder de kleding bekend zijn. Uit de plaatselijke binnen- en buitendruk kan dan de plaatselijke luchtsnelheid door het kledingmateriaal berekend worden met behulp van vergelijking (3).

### 2.3.3 De luchtsnelheid onder de kleding

In bijlage C is afgeleid, dat het debiet van de stroming tussen de kleding en de cilinder,  $\phi_v$ , als volgt berekend kan worden, mits de stroming onder de kleding laminair is:

$$\phi_v(\theta) = \frac{2}{3} \frac{L}{\eta} \left( - \frac{dP_i}{d\theta} \right)_{\theta} \frac{(\Delta R)^3}{R} \quad (4)$$

De dikte van de luchtlaag onder de kleding is hierbij  $2\Delta R$ , de lengte van de cilinder is  $L$  en de straal is  $R$ . De viscositeit van de lucht is gelijk aan  $\eta$ . Het debiet verandert als functie van de hoek,  $\theta$ . De verandering van het debiet is gerelateerd aan de luchtsnelheid door het kledingmateriaal,  $v_{mat}$ . In formulevorm kan dat worden weergegeven als [5]:

$$d\phi_v = v_{mat} L dx = v_{mat} L R d\theta \quad (5)$$

Waarbij  $x$  de plaats op de cilinder is ten opzichte van het stagnatiepunt. Als vergelijking (3) hierin ingevuld wordt, wordt gevonden dat:

$$d\phi_v(\theta) = \frac{10 L R \Delta P}{R_{mat} \rho_w g} d\theta \quad (6)$$

Vervolgens kan vergelijking (4) hierin worden ingevuld. Dit geeft:

$$\frac{2}{3} \frac{L}{\eta} \left( - \frac{d^2 P_{in}}{d\theta^2} \right) \frac{(\Delta R)^3}{R} = \frac{10LR\Delta P}{R_{mat} \rho_w g} = \frac{10LR}{R_{mat} \rho_w g} (P_{uit} - P_{in}) \quad (7)$$

Deze vergelijking beschrijft het drukprofiel tussen de kleding en de cilinder als functie van de plaats. Met behulp van deze vergelijking kan de plaatselijke druk tussen het kledingmateriaal en de cilinder berekend worden. Gecombineerd met vergelijking (4) kan het snelheidsprofiel onder de kleding berekend worden. Overigens dient opgemerkt te worden, dat deze vergelijking niet meer opgaat bij het zogenaamde 'close contact', waarbij de afstand tussen de kleding en de huid nul is.

### 2.3.3.1 Laminaire luchtsnelheid

Als de luchtsnelheid buiten de kleding laminair is, is het mogelijk vergelijking (7) analytisch op te lossen (bijlage D). De luchtsnelheid door het kledingmateriaal is in dat geval:

$$v = \frac{\rho_l}{\rho_w g} \frac{10(1 - 2 \sin^2 \theta)}{\left( 1 + \frac{30}{8} \frac{\eta}{\rho_w g} \frac{R^2}{(\Delta R)^3 R_{mat}} \right)} \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (8)$$

of lokaal, bij een hoek  $\theta$  ten opzichte van het stagnatiepunt:

$$v_{mat} = K_b \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (9)$$

Waarin  $K_b$  een constante is, die afhangt van de straal van de cilinder, de dikte van de luchtlaag, de luchtweerstand van het kledingmateriaal en de hoek ten opzichte van het stagnatiepunt.

### 2.3.3.2 Turbulente luchtsnelheid

Indien de stroming om de kleding turbulent is, kan het drukprofiel niet berekend worden. Dit profiel zal dan moeten volgen uit metingen. In dat geval is vergelijking (7) niet analytisch oplosbaar. Het is wel mogelijk om met behulp van numerieke berekeningen dit profiel te berekenen. Hiervoor is krachtige software nodig. Aangezien deze software niet voorhanden is, is gekozen om gebruik te maken van gemeten drukprofielen.

Het is wel mogelijk om een schatting te maken van de gemiddelde snelheid door het kledingmateriaal (bijlage E). In dat geval kan voor de gemiddelde luchtsnelheid door het kledingmateriaal gevonden worden:

$$v = \frac{5 \rho_l}{\rho_w g} \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (10)$$

of weer:

$$v_{mat} = K_b \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (9)$$

Waarbij alleen de waarde van  $K_b$  verschilt ten opzichte van het laminaire geval. Deze snelheid is het gemiddelde over alle plaatsen waar de lucht naar binnen stroomt.

## 2.4 Empirische relatie voor het berekenen van de luchtsnelheid

Bij het bepalen van de in te stellen luchtsnelheid bij damptesten van NBC-beschermende kleding, wordt een empirische formule gebruikt om de luchtsnelheid door het kledingmateriaal te voorspellen als functie van de windsnelheid en de luchtweerstand van het kledingmateriaal [6-8]:

$$v_{mat} = K_e \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (11)$$

Waarbij  $K_e$  een empirische constante is:  $K_e = 5,7 * 10^{-4} \text{ (mmH}_2\text{O/(cm/s))/(m/s)}$ . Deze empirische formule is gevonden bij de volgende omstandigheden [8]:

$R = 0,025 \text{ m};$

$2\Delta R = 2 * 10^{-3} \text{ m};$

$R_{mat} = 2,66 \text{ mmH}_2\text{O/(cm/s)};$

$v_0 = 9,1 \text{ m/s}.$

Deze luchtsnelheid is een gemiddelde over het gedeelte van het kledingmateriaal, waar de luchtstroom naar binnen gaat.

Vergelijking (9) toont een grote gelijkheid met de empirische vergelijking (11). Zowel vergelijking (8) als (10) geven een analytische uitdrukking voor de empirische constante  $K_e$ .

Deze empirische formule is vergeleken met het model.

### 3 Berekeningen

#### 3.1 Experimentele omstandigheden

Om drukprofielen te berekenen, moeten verschillende constanten en variabelen bekend zijn. Er wordt uitgegaan van standaardomstandigheden (gedefinieerde constante druk en temperatuur etcetera [9]), zodat geldt:

$$\eta = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s};$$

$$\rho_l = 1,182 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3;$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Voor de straal van de cilinder is gekozen voor  $R = 0,05 \text{ m}$ , wat overeenkomt met de straal van een arm. De dikte van de luchtlaag tussen de kleding en de huid is gekozen als  $2\Delta R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

De luchtweerstand van een drietal karakteristieke typen NBC-kleding zijn:

$$\text{USM} : R_{\text{mat}} = 2,21 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s});$$

$$\text{M82} : R_{\text{mat}} = 0,91 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s});$$

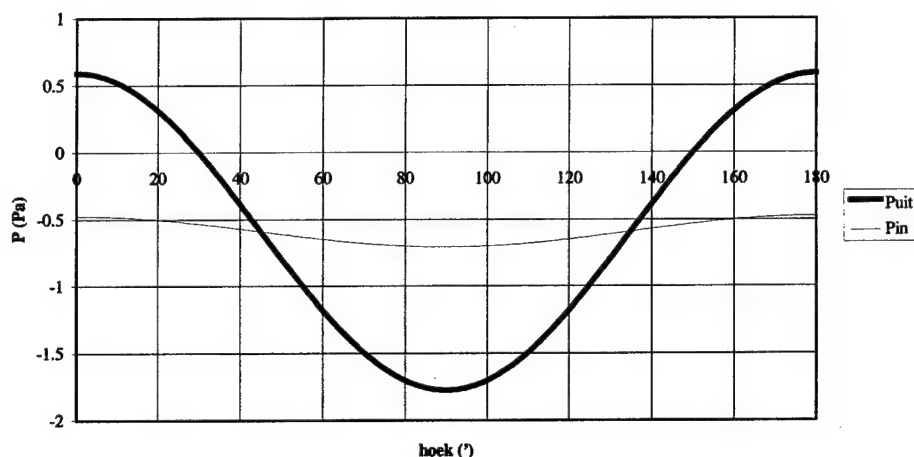
$$\text{OOA} : R_{\text{mat}} = 0,16 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s}).$$

Voor de windsnelheid werd gekozen voor  $1 \text{ m/s}$  en  $5 \text{ m/s}$ . Deze waarden zijn gebruikelijk voor NBC-kledingmateriaaltesten [7].

#### 3.2 Luchtsnelheid

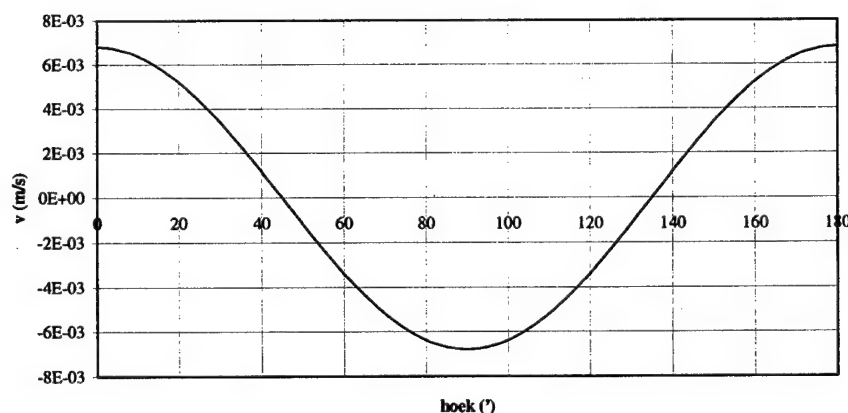
##### 3.2.1 Laminaire stroming

Indien de stroming om de kleding laminair is, beschrijft formule (8) de relatie tussen de druk en de snelheid als functie van de aanstroomhoek ( $Re < 50$ ). Bij een snelheid van  $v_0 = 1 \text{ m/s}$  is de stroming om de kleding duidelijk turbulent ( $Re = 6530$ ). Om een indicatie te krijgen, werd toch op basis van laminaire vergelijkingen de drukverdeling buiten en onder de kleding berekend (figuur 3).



**Figuur 3:** De relatieve drukverdeling buiten en onder de kleding bij een windsnelheid van 1 m/s ( $R_{mat} = 0,16 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s})$ ).

De weergegeven drukken zijn relatieve drukken ten opzichte van de druk ver van de cilinder. Om die reden kunnen ook negatieve drukken gevonden worden. Uit dit drukprofiel kan de plaatselijke snelheid door het kledingmateriaal berekend worden (figuur 4).



**Figuur 4:** De snelheidsverdeling door de kleding bij een windsnelheid van 1 m/s, waarbij een positieve waarde staat voor een luchtsnelheid naar binnen en een negatieve waarde voor een luchtsnelheid naar buiten ( $R_{mat} = 0,16 \text{ mm H}_2\text{O}/(\text{cm/s})$ ).

Voor plaatsen waar de buitendruk hoger is dan de binnendruk, zal de lucht naar binnen stromen, terwijl in het tegengestelde geval de lucht naar buiten stroomt. Vergeleken met de buitendruk, is de binnendruk bijna constant. Omdat de snelheid door het kledingmateriaal schaal met het drukverschil tussen de binnen- en de buitendruk, schaal in dit geval de snelheid met de buitendruk.

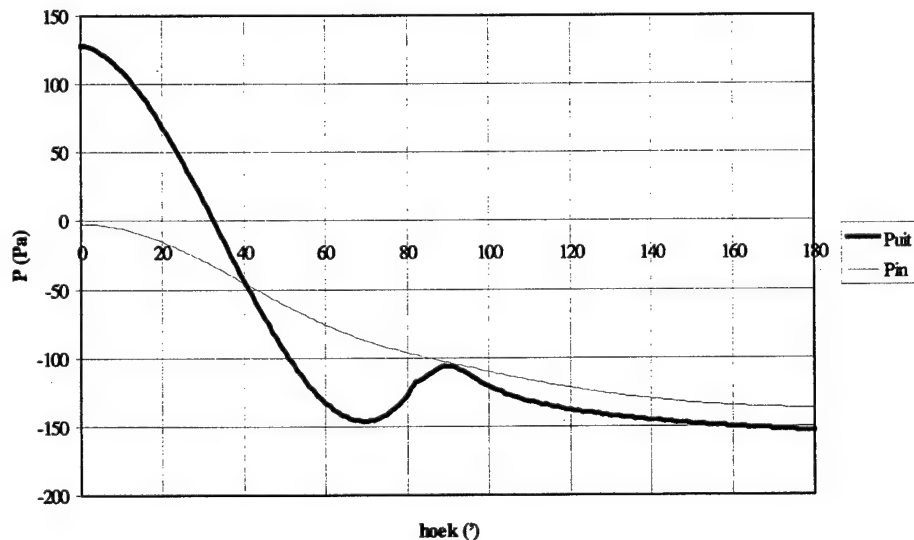
### 3.2.2 Turbulente stroming

Bij turbulente stroming om de kleding is het drukprofiel om de cilinder anders. De aanpak van turbulente stroming gaat uit van experimenteel gemeten buitendrukken. In de literatuur worden gemeten buitendrukken gegeven als functie van de aanstroomhoek om een cilinder, waarbij Reynolds gelijk is aan  $1,9 \cdot 10^5$  [10]. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een cilinder met een straal van 0,1 m bij een windsnelheid van 14,5 m/s (de overige parameters zijn gelijk gesteld aan de vorige berekeningen). Volgens [11] blijft dit drukprofiel qua vorm bijna constant als de mate van turbulentie varieert. De diameter van de cilinder is dus voor dit profiel vrij onbelangrijk. Om het drukprofiel te krijgen bij een andere windsnelheid, moet dan alleen gecorrigeerd worden ten opzichte van het stagnatiepunt (daar is de druk gelijk aan:

$$\frac{1}{2} \rho_l v_{mat}^2,$$

zodat het totale profiel gecorrigeerd kan worden). Volgens [11] is deze werkwijze gerechtvaardigd, aangezien de metingen aantoonde dat het drukprofiel om een cilinder hetzelfde patroon vertoont tussen 5 m/s en 17 m/s.

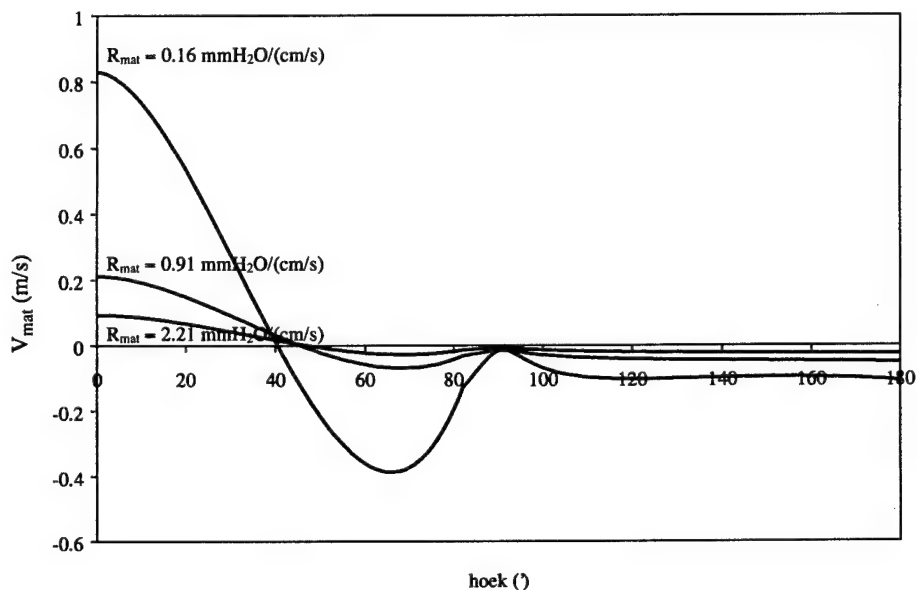
In figuur 5 zijn de gemeten drukken weergegeven, samen met de met vergelijking (7) berekende binnendruk.



**Figuur 5:** De gemeten relatieve buitendruk [10] en de daaruit berekende relatieve binnendruk als functie van de aanstroomhoek bij een windsnelheid van 14,5 m/s en een cilinderdiameter van 0,1 m.

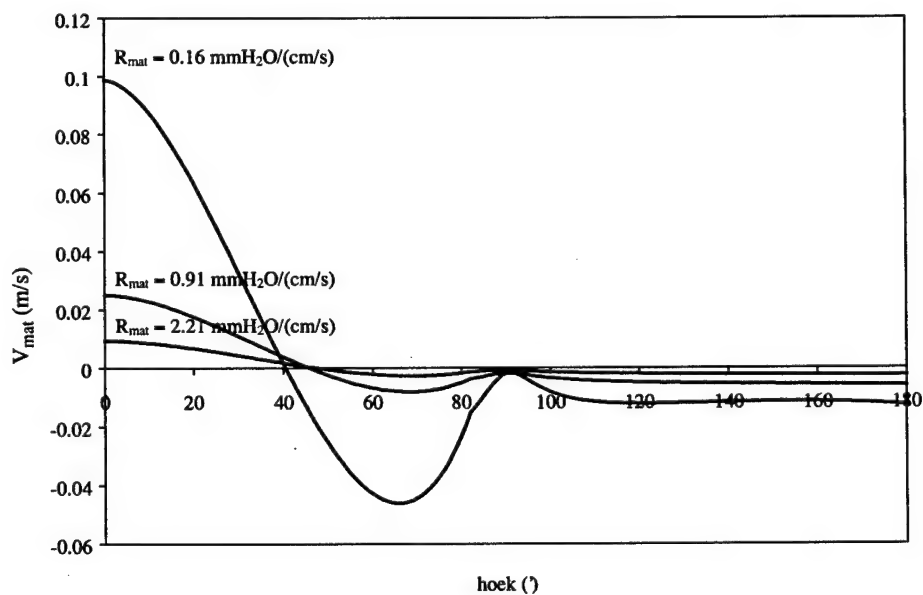
Uit deze twee drukken kan vervolgens de luchtsnelheid door het kledingmateriaal berekend worden met behulp van vergelijking (3). Deze luchtsnelheid is weergegeven in figuur 6. Dit is gedaan voor drie verschillende materialen met verschillende luchtweerstand.





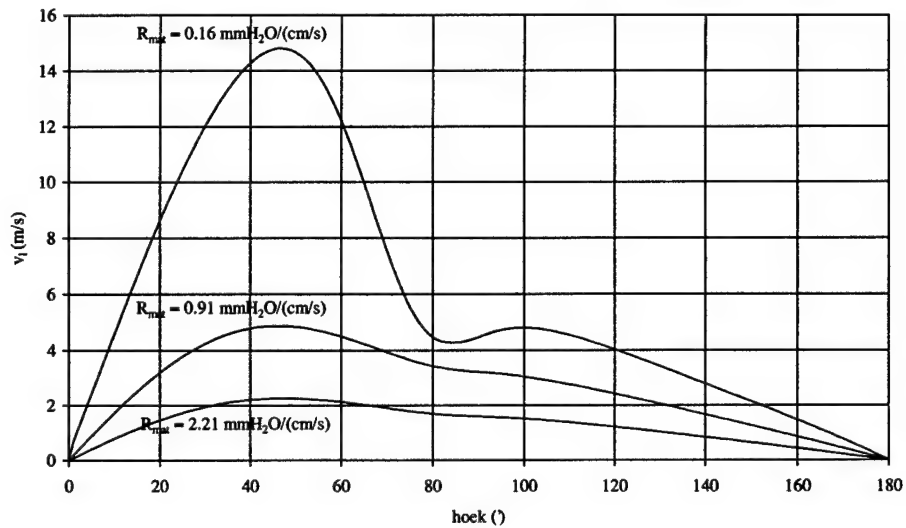
**Figuur 6:** De luchtsnelheid door kledingmateriaal als functie van de aanstroomhoek, volgens uit drukmetingen [10] bij variërende luchtweerstand ( $v_0 = 14,5 \text{ m/s}$  en  $R = 0,1 \text{ m}$ ).

Als dit profiel gebruikt wordt voor een windsnelheid van 5 m/s, wordt een analogoos profiel gevonden (figuur 7).

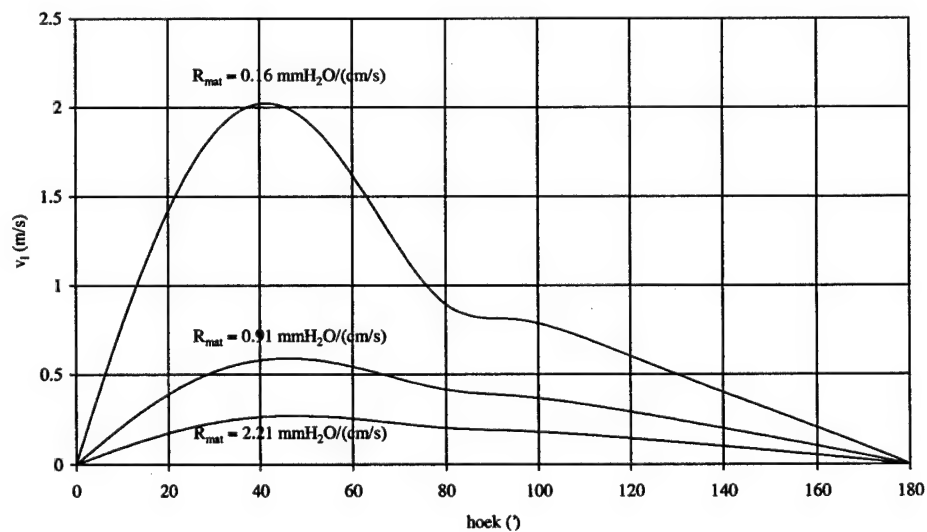


**Figuur 7:** De luchtsnelheid door kledingmateriaal als functie van de aanstroomhoek, volgens uit drukmetingen [10] bij variërende luchtweerstand ( $v_0 = 5 \text{ m/s}$  en  $R = 0,1 \text{ m}$ ).

De maximale snelheid van de lucht in de luchtlaag tussen het kledingmateriaal en de cilinder werd als functie van de aanstroomhoek bepaald volgens bijlage B. De resultaten zijn te zien in figuren 8 en 9.



**Figuur 8:** De luchtsnelheid tussen kledingmateriaal en de cilinder als functie van de aanstroomhoek, bij variërende luchtweerstand ( $v = 14,5$  m/s en  $R = 0,1$  m).



**Figuur 9:** De luchtsnelheid tussen kledingmateriaal en de cilinder als functie van de aanstroomhoek, bij variërende luchtweerstand ( $v = 5$  m/s en  $R = 0,1$  m).

Opvallend is, dat bij hoge windsnelheid en lage luchtweerstand, de luchtsnelheid bij een bepaalde hoek bijna even groot is als de windsnelheid. Het is echter de vraag of de gebruikte vergelijkingen in dat regime nog geldig zijn. Zo is de stroming tussen de cilinder en het kledingmateriaal nog wel laminair, maar al vrij groot ( $Re = 1894$ ). Indien die stroming turbulent wordt, geldt vergelijking (7) niet meer.

Ook de luchtstroom door het kledingmateriaal is vrij groot. Dit kan tot gevolg hebben, dat de luchtsnelheid door het kledingmateriaal niet meer lineair met het drukverschil schaal. In bepaalde gevallen kan een kwadratisch verband gevonden worden [12, 13].

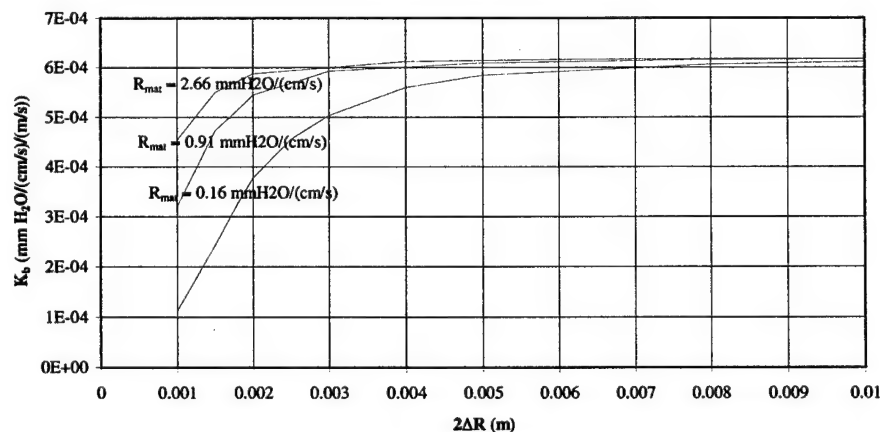
### 3.3 Parameterstudie

Voor turbulente stroming is de invloed van verschillende parameters op het stromingsprofiel door de kleding bestudeerd. Het stromingsprofiel wordt hierbij gekarakteriseerd door  $K_b$  (paragraaf 2.3.3.2) en de maximale hoek waarbij de luchtstroom door het kledingmateriaal inwaarts gericht is (bijlage D).  $K_b$  wordt berekend uit de gemiddelde luchtsnelheid door het kledingmateriaal op de plaatsen waar deze naar binnen toe gericht is. De empirische waarde voor deze parameter is gelijk aan  $K_e = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ (mmH}_2\text{O/(cm/s))/(m/s)}$  (paragraaf 2.4) [8].

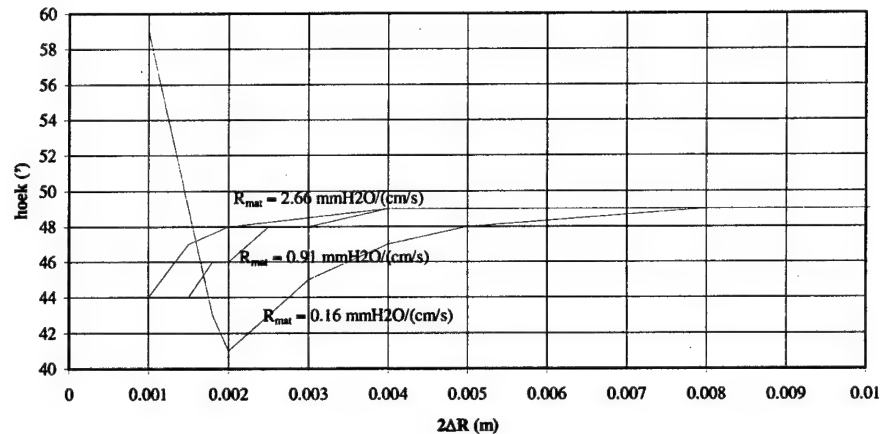
De straal van de cilinder werd gevarieerd van 0,025 m (een vinger) tot 0,3 m (de romp). De dikte van de luchtlaag onder de kleding werd gevarieerd van 0,001 m tot 0,01 m. Dit is gedaan voor de drie kledingmaterialen met verschillende luchtweerstand, zoals genoemd in paragraaf 3.1.

#### 3.3.1 De dikte van de luchtlaag onder de kleding

De invloed van dikte van de luchtlaag op  $K_b$  en  $\theta$  is te zien in figuren 10 en 11.



Figuur 10: De invloed van de dikte van de luchtlaag op de constante  $K_b$  bij verschillende typen kledingmateriaal ( $R = 0,1 \text{ m}$ ).



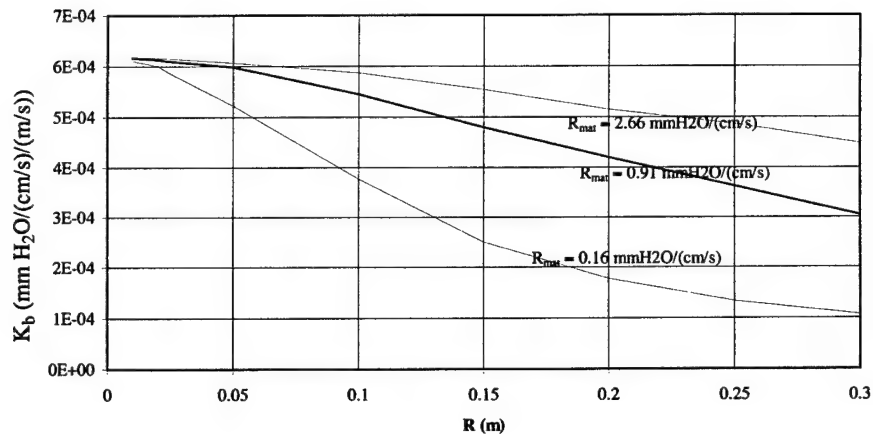
**Figuur 11:** De invloed van de dikte van de luchtlaag op de maximale hoek van inwaartse luchtstroom bij verschillende typen kledingmateriaal ( $R = 0,1$  m).

Als de luchtlaag dikker is dan 5 mm, zijn zowel  $K_b$  als  $\theta$  vrijwel constant.  $K_b$  is circa  $6,2 \cdot 10^{-4}$  (mmH<sub>2</sub>O/(cm/s))/(m/s)). Deze waarde blijkt goed overeen te komen met de experimenteel bepaalde waarde van  $K_e = 5,7 \cdot 10^{-4}$  (mmH<sub>2</sub>O/(cm/s))/(m/s)) (paragraaf 2.4). Als de luchtlaag dunner wordt, kan zowel  $K_b$ , als de hoek kleiner worden. Wanneer dit gebeurt, is afhankelijk van de luchtweerstand van het kledingmateriaal. Het effect is groter bij materialen met een lage luchtweerstand. Het is opvallend, dat de maximale instroomhoek afneemt bij afnemende dikte van de luchtlaag, maar bij verdere verlaging weer gaat toenemen. Een mogelijke oorzaak is, dat de snelheid door het kledingmateriaal bij lage luchtweerstand niet meer lineair verloopt met het drukverschil [12]. Het is echter ook mogelijk, dat de gebruikte vergelijkingen voor het berekenen van het drukprofiel onder de kleding bij die situatie niet meer toepasbaar zijn. Om een uitspraak hierover te doen, moeten drukmetingen verricht worden aan dit systeem. Dit kan gebeuren door zowel de binnen- als de buitendruk te meten bij een met lucht aangestroomde cilinder, bekleed met kledingmateriaal. Met behulp van de resultaten van die metingen kunnen de gebruikte vergelijkingen geverifieerd worden.

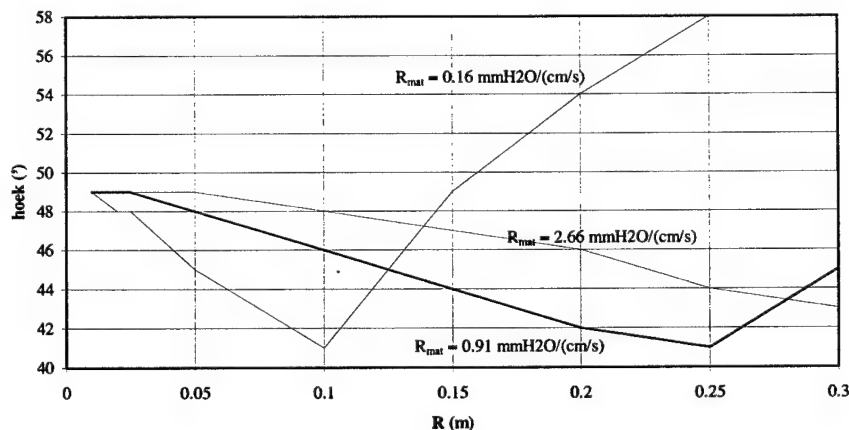
Als de dikte van de luchtlaag gelijk wordt aan 0 ('close contact') zullen de gebruikte vergelijkingen in ieder geval niet meer opgaan. Daar zal een ander model voor ontwikkeld moeten worden.

### 3.3.2 De straal van de cilinder

In figuren 12 en 13 is het effect van de straal van de cilinder op  $K_b$  en  $\theta$  te zien. Hierbij is aangenomen, dat het drukprofiel om de cilinder niet verandert, hoewel Reynolds verandert met de straal. In werkelijkheid zal dit profiel dus iets kunnen afwijken. In welke mate zal uit drukmetingen moeten volgen.



Figuur 12: De invloed van de straal van de cilinder op  $K_b$  bij verschillende typen kledingmateriaal ( $2\Delta R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ).

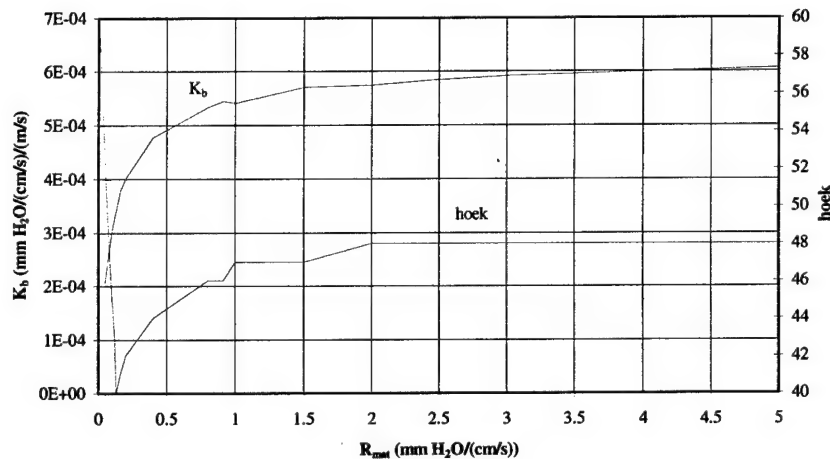


Figuur 13: De invloed van de straal van de cilinder op de maximale hoek van inwaartse luchtstroom bij verschillende typen kledingmateriaal ( $2\Delta R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ).

Een grotere cilinderstraal leidt tot verkleining van  $K_b$ . Verder heeft ook hier verlaaging van de luchtweerstand van kledingmateriaal als effect, dat de verschillende gevolgen eerder merkbaar worden.  $\theta$  Vertoont een iets ander gedrag. Bij hoge luchtweerstand zal vergroting van de straal leiden tot afname van  $\theta$ . Bij lagere luchtweerstand is dit in eerste instantie ook het geval, maar bij een bepaalde straal gaat deze hoek weer toenemen. Dit komt doordat de luchtweerstand door het doek kleiner wordt ten opzichte van de weerstand van de stroming om het doek (de cilinder).

### 3.3.3 De luchtweerstand van de kleding

De invloed van de luchtweerstand van het kledingmateriaal op  $K_b$  en  $\theta$  wordt in figuur 14 gegeven.



**Figuur 14:** De invloed van de luchtweerstand van kledingmateriaal op  $K_b$  en op de maximale hoek van inwaartse luchtstroom ( $v_{mat} = 5 \text{ m/s}$ ,  $2\Delta R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ,  $R = 0,1 \text{ m}$ ).

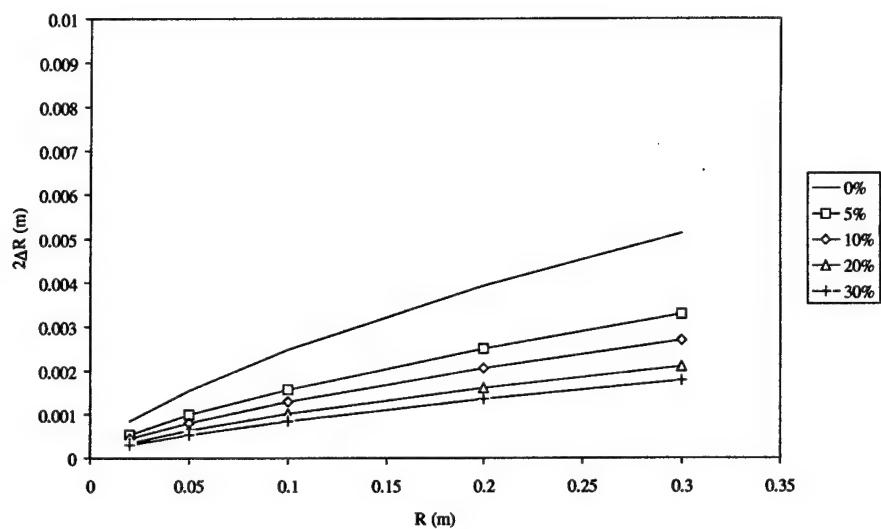
Verlaging van de luchtweerstand geeft in het algemeen een verlaging van  $K_b$ , maar als de luchtweerstand groter is dan circa  $1 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s})$  is dit effect klein. Ook de maximaal inwaartse hoek neemt tot een bepaald punt af. Bij zeer lage luchtweerstand ( $R_{mat} < 0,16 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s})$ ) neemt deze hoek weer toe, maar dit effect zou een numeriek probleem kunnen zijn, omdat vergelijking (7) dan misschien niet meer toepasbaar is. Drukmetingen kunnen hierover uitsluitsel geven. Figuur 14 verandert niet als functie van de windsnelheid, omdat het drukprofiel om de cilinder niet verandert bij verschillende windsnelheden.

### 3.3.4 Vergelijking berekende met gemeten waarde

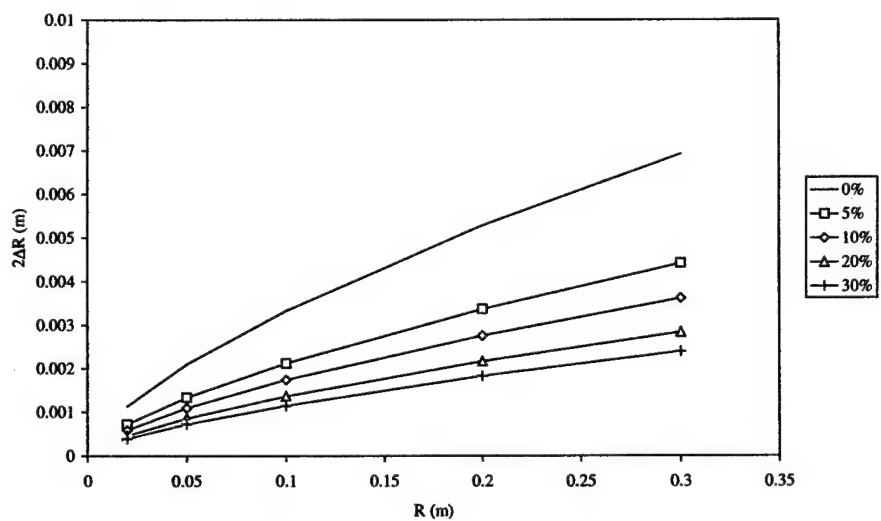
Uit het voorgaande is gebleken dat de mate van overeenkomst tussen  $K_b$  en  $K_e$  afhankelijk is van de straal van de cilinder,  $R$ , de dikte van de luchtlag,  $2\Delta R$ , en de luchtweerstand van het materiaal,  $R_{mat}$ . De procentuele afwijking (verlaging) van  $K_b$  ten opzichte van de experimentele waarde,  $K_e$ , als functie van  $R$  en  $2\Delta R$  is weergegeven in figuren 15, 16 en 17 voor drie verschillende typen kledingmaterialen, waarbij het percentage volgt uit:

$$\text{Percentage} = 100 * \left( 1 - \frac{K_b}{K_e} \right) \quad (12)$$

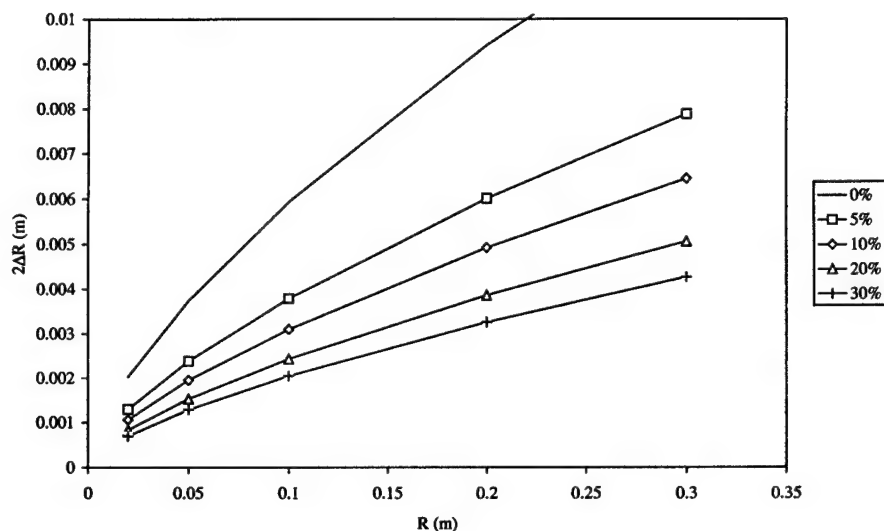
Ook de omstandigheden, waarbij 0% afwijking ten opzichte van de experimentele waarde gevonden wordt, staan in deze figuren gegeven. De experimentele omstandigheden, waarbij  $K_e$  bepaald is, zijn:  $2\Delta R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  en  $R = 0,025 \text{ m}$  (paragraaf 2.4). De waarden van  $K_b$  zijn berekend met behulp van de fit, zoals beschreven in bijlage F. Deze fit geeft een correlatiecoëfficiënt van 0,991 met de uit het model berekende waarden.



**Figuur 15:** Procentuele verlaging van  $K_b$  ten opzichte van de experimentele waarde,  $K_e$ , als functie van  $2\Delta R$  en  $R$ , bij kledingmateriaal USM.



**Figuur 16:** Procentuele verlaging van  $K_b$  ten opzichte van de experimentele waarde,  $K_e$ , als functie van  $2\Delta R$  en  $R$ , bij kledingmateriaal M82.



**Figuur 17:** Procentuele verlaging van  $K_b$  ten opzichte van de experimentele waarde,  $K_e$ , als functie van  $2\Delta R$  en  $R$ , bij kledingmateriaal OOA.

Uit de figuren is te zien, dat vergroting van de cilinderstraal,  $R$ , of verkleining van de dikte van de luchtlaag,  $2\Delta R$ , een verlaging van de waarde van  $K_b$  tot gevolg heeft. Verder is te zien, dat deze effecten groter zijn bij kledingmateriaal wat een lagere luchtweerstand heeft.

Aan de andere kant zal bij toename van  $2\Delta R$  en afname van  $R$  de berekende waarde,  $K_b$ , naderen tot een limietwaarde  $5,81 \cdot 10^{-4}$  (mmH<sub>2</sub>O/(cm/s)/(m/s)). Dit is 1,9% boven de gemeten waarde,  $K_e$ . Indien de limietwaarde niet uit de bovengenoemde fit berekend wordt, maar uit het model moet volgen, zal deze niet berekend kunnen worden, maar zal benaderd moeten worden. In paragraaf 3.3.1 werd op die manier een waarde van circa  $6,2 \cdot 10^{-4}$  (mmH<sub>2</sub>O/(cm/s)/(m/s)) gevonden, hetgeen 8,8% boven de experimentele waarde ligt.

De waarde van  $K_e$  komt dus goed overeen met de maximale waarde van  $K_b$ . Aan gezien de damptest voor NBC-beschermende kledingmaterialen wordt uitgevoerd bij een luchtsnelheid door het kledingmateriaal die evenredig is met  $K_e$ , kan deze testopzet als 'worst case'-scenario worden beschouwd.



## 4 Conclusies

Er is een model ontwikkeld, dat de luchtstroming om, door en onder de kleding om een lichaamsdeel kan berekenen. Het lichaamsdeel wordt hierbij gekarakteriseerd door een cilinder, die op een bepaalde afstand door kledingmateriaal is omspannen.

Als de stroming om de kleding laminair is, zijn stromingsprofielen om, door en onder de kleding analytisch te berekenen. In de praktijk echter, is de luchtstroom om de kleding vaak turbulent. In dat geval moet het drukprofiel om de kleding bekend zijn om het stromingsprofiel te kunnen berekenen. Dit drukprofiel kan volgen uit numerieke berekeningen of kan experimenteel bepaald worden. In dit rapport zijn experimentele gegevens uit de literatuur gebruikt.

Bij de uitvoering van de damptest van NBC-beschermende kledingmaterialen wordt gebruikgemaakt van een empirische formule voor de berekening van de luchtsnelheid door het materiaal. Deze formule werd vergeleken met de uitkomsten van berekeningen, verkregen met behulp van het model. De luchtsnelheid door de kleding wordt binnen een marge van 10% van de experimenteel bepaalde waarde voorspeld. Dit geldt echter alleen bij dezelfde experimentele omstandigheden, als waarbij de empirische formule bepaald is.

Een parameterstudie toont aan, dat de luchtsnelheid door het kledingmateriaal afneemt bij afnemende dikte van de luchtlaag onder de kleding. Het grootste effect wordt gevonden bij kledingmateriaal met een lage luchtweerstand. Vergroting van de diameter van de cilinder leidt eveneens tot afname van de luchtsnelheid door het kledingmateriaal. Ook hier wordt het grootste effect gevonden bij kledingmateriaal met lage luchtweerstand.

Ter verbetering van het model zullen drukprofielen om cilinders bekleed met kledingmateriaal gemeten worden en/of numeriek berekend worden met behulp van een 'Computational Fluid Dynamics'-programma. Verder zal het model worden uitgebreid met de mogelijkheid van 'close contact', waarbij de afstand tussen de kleding en de huid gelijk is aan nul.

Het model zal in combinatie met het reeds bestaande model voor de damppenetratie door het materiaal als uitgangspunt dienen voor het modelleren van het damptransport naar het cilinderoppervlak.

## 5 Literatuur


- [1] Ubbink, J. en Leeuw, M.W.,  
'Diffusion limited dynamic adsorption models',  
TNO-rapport PML 1993-C35, (1993), Rijswijk.
- [2] Eijndt, M.L.P. en Rohde, M.,  
'Modelling of the initial breakthrough concentration of chemical agents  
through Saratoga clothing',  
TNO-rapport PML 1995-A26, (1995), Rijswijk.
- [3] Mensink, C.,  
'Dynamic adsorption modelling for protective clothing and filter- beds',  
TNO-rapport PML 1994-A37, (1995), Rijswijk.
- [4] Brasser, P. en Kaaijk, J.,  
'Dynamic adsorption modelling of initial breakthrough through NBC  
clothing',  
TNO-rapport PML 1997-A61, (1997), Rijswijk.
- [5] Fedele, P.D.,  
'Model of aerosol protection offered by permeable protective garments',  
American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1992).
- [6] Oudmayer, H.F.G. en Wittgen, P.P.M.M.,  
'Laboratory evaluation methods for NBC and chemical protective clothing',  
TNO-rapport PML 1991-82, (1991), Rijswijk.
- [7] NATO army araments group; NBC defence panel,  
'NBC protective clothing triptych: combined operational requirements, tech-  
nical specification and evaluation criteria (triptych) for NBC protective  
clothing',  
AC/225 D/101, (1995), NATO, Brussel.
- [8] Wal, J.F. van der,  
'Permeabele beschermende kleding, II De penetratie van aërosol door kle-  
ding',  
TNO-rapport 1967-22, (1967), Rijswijk.
- [9] 'CRC Handbook of Chemistry and Physics',  
CRC press, (1997).
- [10] Bennett, C.O. en Myers, J.E.,  
'Momentum, heat, and mass transfer',  
McGraw-Hill Book company, New York, 3, (1982).
- [11] Kind, R.J.; Jenkins, J.M. en Broughton, C.A.,  
'Measurements and prediction of wind-induced heat transfer through perme-  
able cold-weather clothing',  
Cold regions Science and Technology 23, 305 (1995).

- [12] Payne, P.R.,  
    'The theory of fabric porosity as applied to parachutes in incompressible  
    flow',  
    Aeronautic Quarterly 175, (1978).
- [13] Hoke, L.; Segars, R.A.; Cohen, S.; King, A. en Johnson, E.,  
    'Low speed air-flow characterization of military fabrics',  
    NATICK/TR-89/013, (1988), United States Army Natick Research,  
    Development and Engineering Center, Massachusetts.
- [14] Streeter, V.L. en Wylie, E.B.,  
    'Fluid mechanics; first SI metric edition',  
    McGraw-Hill, Auckland, 2, 1987.

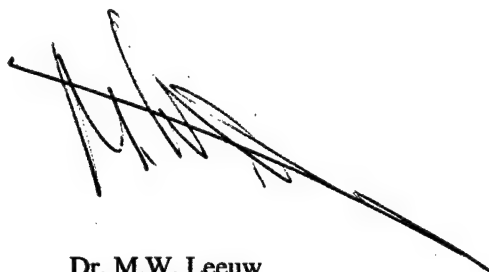
## 6 Ondertekening



Dr. ir. P. Brasser  
Projectleider/Auteur



Ir. J. Kaaijk  
Auteur

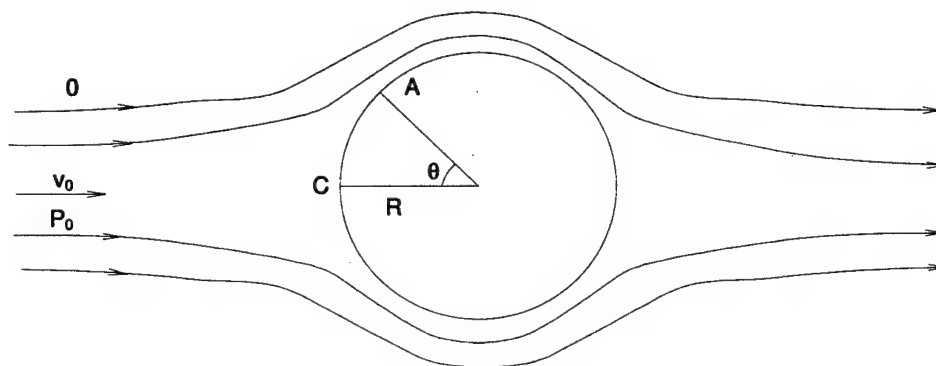


Dr. M.W. Leeuw  
Groepshoofd

---

## Bijlage A Het drukprofiel om een cilinder bij laminaire stroming

Als een gasstroom tegen een cilinder stroomt, kan een stromingsprofiel ontstaan, zoals weergegeven in Figuur A.1. Voorwaarde voor het ontstaan van een dergelijk stromingsprofiel is dat de gassnelheid erg laag is ( $Reynolds < 50$ ). In dat geval zal het stromingspatroon achter de cilinder precies het spiegelbeeld zijn van voor de cilinder. Als dat niet het geval is, zal de gasstroom aan de achterkant van de cilinder eerder loslaten, zodat het stromingsprofiel verandert. Er zullen kleine wervelingen achter de cilinder kunnen ontstaan. Het grootste deel van het stromingsprofiel blijft echter over het totale laminaire gebied gelijk.



Figuur A.1: Stromingsprofiel van een gasstroom om een cilinder bij lage Reynolds ( $Re < 50$ ).

Op het punt C (het stagnatiepunt) is de gassnelheid 0. Op het punt A stroomt het gas met een bepaalde snelheid,  $v_A$ , langs. Deze snelheid zal in dit laminaire geval gelijk zijn aan [14]:

$$v_A = 2v_0 \sin \theta \quad (A.1)$$

Langs een stroomlijn, zoals weergegeven in figuur A.1, kan de druk op elk punt op de stroomlijn berekend worden met behulp van de vergelijking van Bernoulli [A.1]:

$$\frac{P}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 = \text{const.} \quad (A.2)$$

In dit geval kan aangenomen worden, dat  $h=0$ . Vergelijken we nu de situatie op plek 0 en op plek A, dan kan voor vergelijking (A.2) geschreven worden:

$$P_A = P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 - \frac{1}{2}\rho v_A^2 \quad (A.3)$$

Als vergelijking (A.1) hierin wordt ingevuld, levert dit:

$$P_A = P_0 + \frac{l}{2} \rho v_0^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (\text{A.4})$$

Met behulp van deze vergelijking kan dus het drukprofiel om een cilinder heen berekend worden in het geval van laminaire stroming.

- [14] Streeter, V.L. en Wylie, E.B.,  
'Fluid mechanics; first SI metric edition',  
McGraw-Hill, Auckland, 2, 1987.

## Bijlage B      Luchtsnelheid door kledingmateriaal

De snelheid,  $v$  (in m/s), waarmee de lucht door het kledingmateriaal gaat, is lineair evenredig met het drukverschil,  $\Delta P$ , over het kledingmateriaal. In principe kan kledingmateriaal gezien worden als een filter. De wet van Darcy beschrijft de snelheid door een filter als volgt:

$$v = K \frac{l}{\eta} \Delta P \quad (\text{B.1})$$

Waarin  $K$  een constante is,  $l$  de dikte van het filter is en  $\eta$  de viscositeit van het medium is.  $K$ ,  $l$  en  $\eta$  worden in het geval van lucht soms gecombineerd tot een nieuwe term,  $\Gamma$ , welke de luchtpermeabiliteit (in m/(Pa s)) genoemd wordt, zodat:

$$v = \Gamma \Delta P \quad (\text{B.2})$$

De reciproke van de luchtpermeabiliteit is de luchtweerstand. Het is de gewoonte deze luchtweerstand uit te drukken in mmH<sub>2</sub>O/(cm/s). Dit levert voor de luchtweerstand,  $R_{mat}$ , op:

$$R_{mat} = \frac{10}{\Gamma \rho_w g} \quad (\text{B.3})$$

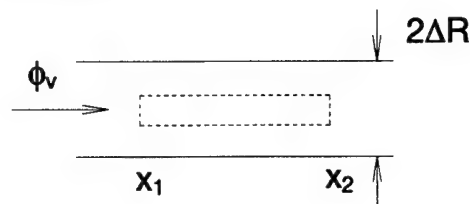
Waarbij  $\rho_w$  de dichtheid van water is en  $g$  de valversnelling is. Voor de snelheid door het kledingmateriaal kan dus geschreven worden:

$$v_{mat} = \frac{10 \Delta P}{R_{mat} \rho_w g} \quad (\text{B.4})$$

De snelheid van lucht door kledingmateriaal hangt dus af van de luchtweerstand van dat kledingmateriaal.

## Bijlage C Het snelheidsprofiel onder kledingmateriaal

In eerste instantie kan het snelheidsprofiel tussen kledingmateriaal en een cilinder benaderd worden met het snelheidsprofiel tussen twee platen. In figuur C.1 zijn twee platen weergegeven, waar gas met een bepaald debiet,  $\phi_v$ , tussendoor stroomt. De afstand tussen de twee platen is gelijk aan  $2\Delta R$ . De platen steken een lengte  $L$  uit de figuur in de diepte.



Figuur C.1: Luchtstroom tussen twee platen met hierin een volume-elementje.

Beschouwen we een volume-elementje met een dikte  $2r$ , een lengte  $(x_2 - x_1)$  en een diepte  $L$ , dan kunnen we daar een krachtenbalans over berekenen. De krachten waar rekening mee gehouden moet worden, zijn de druk die voor en achter het elementje op het oppervlak  $2rL$  drukt, en de schuifspanning,  $\tau$ , die op de twee zijanten van het elementje werkt. In formulevorm ziet deze balans er uit als:

$$2rLP_1 - 2rLP_2 - 2L(x_2 - x_1)\tau = 0 \quad (C.1)$$

Als de afstand tussen  $x_1$  en  $x_2$  klein wordt gekozen, zodat  $(x_2 - x_1) = dx$ , kan deze vergelijking geschreven worden als:

$$\tau = r \left( -\frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (C.2)$$

De schuifspanning is gerelateerd aan de viscositeit,  $\eta$ , van het medium (de lucht) en het snelheidsverschil tussen de twee lagen. Voor een Newtons-medium (zoals bijvoorbeeld lucht of water) geldt:

$$\tau = -\eta \frac{\partial v}{\partial r} \quad (C.3)$$

zodat:

$$\frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{r}{\eta} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (C.4)$$

Dus voor de snelheid op punt  $r$ , tussen de platen, kan na integratie gevonden worden:

$$v_r = -\frac{r^2}{2\eta} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} \right) + A \quad (C.5)$$



Waarbij A een integratieconstante is. Aan de rand van de spleet, op  $r=\Delta R$ , is de snelheid  $v_r$  gelijk aan 0. Dit levert op, dat:

$$v_r = \frac{1}{2\eta} \left( -\frac{dP}{dx} \right) \left( (\Delta R)^2 - r^2 \right) \quad (C.6)$$

Dit is het bekende parabolische snelheidsprofiel van laminaire flow (Poisseulle-stroming). Hieruit is het debiet, dat tussen de twee platen door stroomt, te berekenen:

$$\phi_v = 2 \int_0^{\Delta R} L v_r dr = \frac{2}{3} \frac{L}{\eta} \left( -\frac{dP}{dx} \right) (\Delta R)^3 \quad (C.7)$$

Deze vergelijking geeft het debiet tussen twee platen. Deze relatie kan omgeschreven worden naar de stroming tussen kledingmateriaal en een cilinder, door aan te nemen, dat de straal van de cilinder, R, groot is ten opzichte van de luchtlaag,  $2\Delta R$ . In dat geval geldt namelijk:

$$dx \approx R d\theta \quad (C.8)$$

Dit geeft:

$$\phi_v(\theta) = \frac{2}{3} \frac{L}{\eta} \left( -\frac{dP_{in}}{d\theta} \bigg|_{\theta} \right) \frac{(\Delta R)^3}{R} \quad (C.9)$$

Het debiet verandert als functie van de hoek, omdat lucht het kledingmateriaal in of uit zal stromen. De gemiddelde snelheid waarmee de lucht tussen het kledingmateriaal en de cilinder door stroomt, is:

$$\langle v(\theta) \rangle = \frac{\phi_v(\theta)}{2\Delta RL} = \frac{1}{3\eta} \left( -\frac{dP_{in}}{d\theta} \bigg|_{\theta} \right) \frac{(\Delta R)^2}{R} \quad (C.10)$$

En de maximale snelheid (in het centrum tussen de platen, bij  $r = 0$ ) is:

$$v(\theta)_{max} = \frac{1}{2\eta} \left( -\frac{dP_{in}}{d\theta} \bigg|_{\theta} \right) \frac{(\Delta R)^2}{R} \quad (C.11)$$

## Bijlage D Analytische oplossing van de luchtsnelheid; laminaire stroming

Het drukprofiel onder het kledingmateriaal volgt uit vergelijking (D.1):

$$\frac{2}{3} \frac{L}{\eta} \left( - \frac{d^2 P_{in}}{d\theta^2} \right) \frac{(\Delta R)^3}{R} = \frac{10LR\Delta P}{R_{mat} \rho_w g} = \frac{10LR}{R_{mat} \rho_w g} (P_{uit} - P_{in}) \quad (D.1)$$

Indien de luchtstroom om de kleding laminair is, is vergelijking (D.1) analytisch oplosbaar (zie ook [5]). In bijlage A is een relatie afgeleid voor de buitendruk als functie van de aanstroomhoek voor lage Reynolds-getallen ( $Re < 50$ ). In dat geval was de buitendruk gelijk aan:

$$P_A = P_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (D.2)$$

Omdat het drukverschil wordt genomen in vergelijking (D.1), valt  $P_0$  weg. Als vervolgens vergelijking (D.2) ingevuld wordt in vergelijking (D.1), wordt gevonden:

$$\frac{d^2 P_{in}}{d\theta^2} \bigg|_{\theta} = K (P_{uit}(0) (1 - 4 \sin^2 \theta) - P_{in}) \quad (D.3)$$

met:

$$K = \frac{30}{2} \frac{\eta}{R_{mat} \rho_w g} \frac{R^2}{(\Delta R)^3} \quad (D.4)$$

en:

$$P_{uit}(0) = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad (D.5)$$

Als nu aangenomen wordt, dat de binnendruk een functie is van de aanstroomhoek op een analoge manier als de buitendruk:

$$P_{in} = A - B \sin^2 \theta \quad (D.6)$$

dan kan door invulling van vergelijking (D.6) in vergelijking (D.3) gevonden worden dat:

$$A = P_{uit}(0) \left( 1 - \frac{8}{4 + K} \right) \quad (D.7)$$

en:

$$B = P_{uit}(0) \frac{4K}{4 + K} \quad (D.8)$$

zodat:

$$P_{in}(\theta) = P_{uit}(0) \left( 1 - \frac{8}{4+K} - \frac{4K}{4+K} \sin^2 \theta \right) \quad (D.9)$$

De luchtsnelheid (in m/s) door het kledingmateriaal heen, is gerelateerd aan het drukverschil (vergelijking (D.10)):

$$v = \frac{10}{R_{mat} \rho_w g} (P_{uit} - P_{in}) \quad (D.10)$$

Beide drukken zijn in dit laminaire geval bekend, zodat voor de luchtsnelheid door het kledingmateriaal heen gevonden wordt:

$$v = \frac{80}{R_{mat} \rho_w g} \frac{P_{uit}(0)}{(4+K)} (1 - 2 \sin^2 \theta) \quad (D.11)$$

Of als de buitendruk bij hoek 0 ingevuld wordt:

$$v = K_b \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (D.12)$$

Waarbij de constante  $K_b$  gelijk is aan:

$$K_b = \frac{\rho_l}{\rho_w g} \frac{40}{(4+K)} (1 - 2 \sin^2 \theta) \quad (D.13)$$

Bij nadere beschouwing is deze constante dus niet constant, maar een functie van de aanstroomhoek. Toch is vergelijking (D.12) op deze manier weergegeven, omdat hij dan goed te vergelijken is met de empirische relatie (D.14):

$$v = K_e \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (D.14)$$

Relatie (D.14) geeft de gemiddelde luchtsnelheid door het kledingmateriaal op de plaatsen, waar de luchtstroom het kledingmateriaal in gericht is. Om relatie (D.14) dus theoretisch te verifiëren, moet eerst gemiddeld worden. Als eerste moet gekeken worden, tussen welke twee hoeken de stroom inwaartse gericht is. De empirische formule ging ervan uit, dat de stroom inwaarts gericht is tussen  $\theta = \pm 45^\circ$ . Op de grens tussen inwaartse en uitwaartse luchtstroom zal gelden:  $v=0$ . Dus:

$$1 - 2 \sin^2 \theta = 0 \quad (D.15)$$

Hieruit volgt inderdaad, dat  $\theta = \pm 45^\circ$ .

De snelheid, die volgt uit vergelijking (D.11), is plaatsgebonden. Om een vergelijkbaar getal te vinden met de empirische waarde van  $K_e$ , zal dus de snelheid gemiddeld moeten worden tussen  $-45^\circ$  en  $45^\circ$ . In formulevorm:

$$\langle v \rangle = \frac{\rho_l}{g\rho_w (4+K) R_{mat}} \frac{40}{v_0^2} \frac{\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} (1 - 2 \sin^2 \theta) d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} d\theta} = \frac{\rho_l}{g\rho_w (4+K) R_{mat}} \frac{40}{v_0^2} \frac{[\sin \theta \cos \theta]_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}}{[\theta]_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}} \quad (D.16)$$

Dit geeft dus:

$$\langle v \rangle = \frac{\rho_l}{g\rho_w (4+K) R_{mat}} \frac{40}{v_0^2} \frac{2}{\pi} \quad (D.17)$$

Zodat voor de constante,  $K_b$ , gevonden wordt:

$$K_b = \frac{80}{\pi(4+K)} \frac{\rho_l}{g\rho_w} \quad (D.18)$$

De empirische formule (D.14) werd gevonden door gebruik te maken van de volgende experimentele omstandigheden [8]:

$$v_0 = 9,1 \text{ m/s};$$

$$2\Delta R = 2 * 10^{-3} \text{ m};$$

$$R = 25 * 10^{-3} \text{ m};$$

$$R_{mat} = 2,66 \text{ mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s}).$$

Dit levert op:

$$Re = 3 * 10^4;$$

$$K = 6 * 10^{-3} \text{ en } K_b = 7,66 * 10^{-4} (\text{mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s})) / (\text{m/s}).$$

Experimenteel werd gevonden:  $K_e = 5,7 * 10^{-4} (\text{mmH}_2\text{O}/(\text{cm/s})) / (\text{m/s}).$

De laminaire schatting is dus circa 30% te hoog ten opzichte van de experimentele waarde. De stroming is verre van laminair in dit geval (zie Reynolds). Een verschil was dus te verwachten.

- [5] Fedele, P.D.,  
'Model of aerosol protection offered by permeable protective garments',  
American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1992).

- [8] Wal, J.F.v.d.,  
'Permeabele beschermende kleding, II De penetratie van aërosol door kleding',  
TNO-rapport 1967-22, (1967), Rijswijk.

## Bijlage E      Analytische oplossing van de luchtsnelheid; turbulente stroming

Indien de luchtstroom turbulent is, zal de drukverdeling om de cilinder anders zijn dan in het laminaire geval. Dit heeft dus gevolgen voor de snelheid door het kledingmateriaal, aangezien aangenomen wordt dat het ontwikkelde model blijft gelden. Om plaatselijke luchtsnelheden te berekenen moet uitgegaan worden van gemeten drukprofielen. In het turbulente geval is dus geen analytische oplossing te vinden voor het model. Geïntegreerd over het totale oppervlak van de cilinder is wel wat bekend over de buitendruk:

$$P_{uit} = C_w \frac{1}{2} \rho_l v_0^2 \quad (E.1)$$

Waarbij  $C_w$  een wrijvingsterm ('drag') is. Deze term is een functie van Reynolds in het laminaire gebied, maar in het turbulente gebied wordt hij ongeveer constant.

Voor cilinders geldt:  $C_w \approx 1$ . Als vervolgens de binnendruk verwaarloosd wordt ten opzichte van de buitendruk, dan kan gevonden worden:

$$v = \frac{10}{R_{mat} g \rho_w} \frac{1}{2} \rho_l v_0^2 = \frac{5 \rho_l}{g \rho_w} \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (E.2)$$

De constante,  $K_b$ , is dan gelijk aan:

$$K_b = \frac{5 \rho_l}{g \rho_w} \quad (E.3)$$

Dit geeft  $K_b = 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ (mmH}_2\text{O/(cm/s))/(m/s)}$ . Dit ligt dus erg dicht bij de experimentele waarde van  $K_e$ :  $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ (mmH}_2\text{O/(cm/s))/(m/s)}$ .

Een nadeel van deze rekenwijze, is dat niets gezegd kan worden over plaatselijke drukken als functie van de aanstroomrichting. Verder kan de invloed van waarden, zoals de afstand tussen het kledingmateriaal en de cilinder, op de luchtsnelheid niet bepaald worden.

## Bijlage F      Parameteranalyse

### F.1      Laminaire stroming

In de parameterstudie is steeds per parameter gekeken naar het effect op  $K_b$ . Het zou handig zijn, om de effecten van de verschillende parameters samen te vegen in een nieuwe parameter, zodat het effect van alle verschillende parameters vergeleken kan worden in één plaatje. In het laminaire geval is wel bekend hoe de verschillende parameters invloed uitoefenen op  $K_b$ . Deze relatie wordt afgeleid in Bijlage D en ziet er als volgt uit:

$$K_b = \frac{80}{\pi \left( 4 + \frac{30}{2} \frac{\eta}{R_{mat} \rho_w g} \frac{R^2}{(\Delta R)^3} \right)} \frac{\rho_l}{8 \rho_w} \quad (F.1)$$

Dit is ook te schrijven als:

$$\frac{1}{K_b} = \frac{\pi}{20} \frac{\rho_w g}{\rho_l} + 3\pi \frac{\eta}{\rho_l} \frac{R^2}{(2\Delta R)^3 R_{mat}} \quad (F.2)$$

Als hierbij de bekende waarden ingevuld worden, dan kan het volgende rechtlijnige verband gevonden worden:

$$\frac{1}{K_b} = 1303,68 + 7,216 * 10^{-5} \frac{R^2}{(2\Delta R)^3 R_{mat}} \quad (F.3)$$

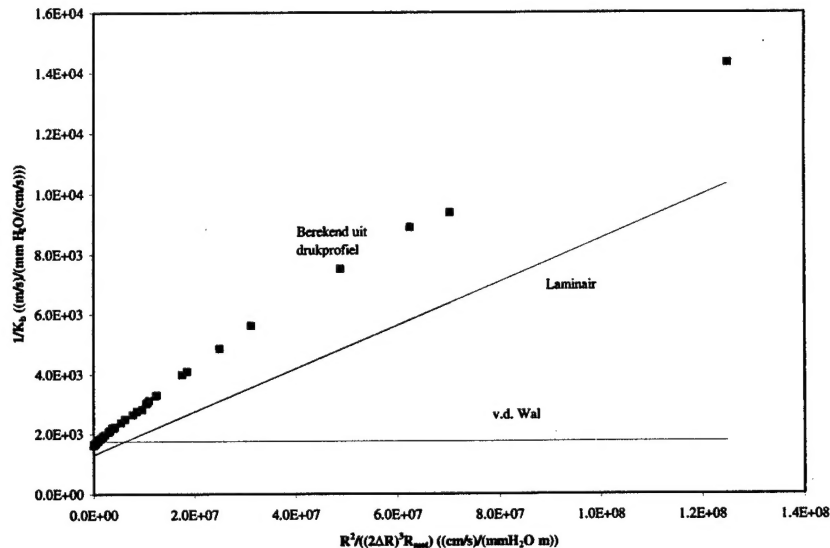
Dus een plot van de reciproke waarde van  $K_b$  tegen de verhouding

$$\frac{R^2}{(2\Delta R)^3 R_{mat}}$$

geeft in het laminaire geval een rechte. In het laminaire geval kan de invloed van de verschillende parameters dus samengevoegd worden tot deze verhouding.

### F.2      Turbulente stroming

Het ligt voor de hand om te bekijken, hoe de uit het drukprofiel berekende waarden zich gedragen als functie van de bovengenoemde verhouding. In figuur F.1 is dit verband te zien.



*Figuur F.1: De reciproke van  $K_b$  als functie van een gecombineerde parameter.*

Uit figuur F.1 zijn verschillende resultaten te halen. Als eerste is duidelijk te zien, dat de empirische formule (Van der Wal in figuur F.1) geen rekening houdt met de invloed van de verschillende parameters. Er is een constante waarde aangenomen. Ter vergelijking is het verband weergegeven voor het laminaire geval (vergelijking (F.3)).

Verder is te zien, dat deze verhouding een goede manier is om een totaalbeeld van de invloed van de verschillende parameters te krijgen. Er wordt een goed verband gevonden tussen deze verhouding en de reciproke van  $K_b$ . Hoewel dit verband niet helemaal lineair is, geeft de volgende empirische relatie toch een correlatie-coëfficiënt van  $r^2 = 0,991$ :

$$\frac{1}{K_b} = 1722 + 10,85 \cdot 10^{-5} \frac{R^2}{(2\Delta R)^3 R_{mat}} \quad (F.4)$$

De overeenkomst tussen vergelijking (F.3) en (F.4) is opvallend. Overigens is het sprekend om vergelijking (F.4) als volgt te schrijven:

$$K_b = \frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{1 + 6,3 \cdot 10^{-8} \frac{R^2}{(2\Delta R)^3 R_{mat}}} \quad (F.5)$$

Als de invloed van de verschillende parameters verwaarloosd wordt (het tweede deel van de noemer van vergelijking (F.5)), wordt op 1,9% nauwkeurig de empirische waarde van  $K_e$  gevonden. Dit geeft wel erg veel ondersteuning aan zowel de metingen [8] als de hier uitgevoerde theoretische berekeningen. Het heeft wel als resultaat, dat de empirische formule in sommige gevallen iets aangepast moet worden. Deze aanpassing kan voor lage luchtweerstand ('Out Of Area'-

materialen) belangrijk zijn. In dat geval zal de luchtsnelheid door kledingmateriaal berekend moeten worden met:

$$v_{mat} = \frac{5,8 * 10^{-4}}{1 + 6,3 * 10^{-8} \frac{R^2}{(2\Delta R)^3 R_{mat}}} \frac{v_0^2}{R_{mat}} \quad (F.6)$$

Zoals al eerder opgemerkt is, geeft deze formule alleen een waarde voor de gemiddelde snelheid door het kledingmateriaal op de plaatsen waar de luchtstroom naar binnen gericht is.

- [8] Wal, J.F. van der,  
'Permeabele beschermende kleding, II De penetratie van aërosol door kleding',  
TNO-rapport 1967-22, (1967), Rijswijk.



## REPORT DOCUMENTATION PAGE

### (MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO. (MOD-NL) TD98-0348	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. PML 1998-A107
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 212498086	5. CONTRACT NO. B93KL458	6. REPORT DATE June 1999
7. NUMBER OF PAGES 39 (incl. 6 annexes, excl. RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 14	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Modelling of the protective performance of NBC-clothing 1 Flow profile between clothing and skin (Modellering bescherming NBC-kleding 1 Stromingsprofiel tussen kleding en huid)		
11. AUTHOR(S) Dr. P. Brasser and J. Kaaijk		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Prins Maurits Laboratory, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) LBBKL-KPU/GVG, P.O. Box 3003, 3800 DA Amersfoort, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE))  A model has been developed, which can calculate the airflow profile around, through and underneath NBC protective clothing. In this model, a body part is represented by a cylinder, which at a defined distance is covered with clothing material. The pressure-profile around the clothing must be known in order to calculate the flow profile underneath the clothing. In this report pressure profiles are taken as found in literature. Calculated results from the model were compared to results from an empirical formula, which is used for vapour tests on NBC protective clothing material. The results showed good agreement under the conditions used to determine the empirical formula. The effect on the calculated results of several parameters was investigated by means of a parameter study. Decrease in the size of the airgap underneath the clothing, or increase of the radius of the cylinder, resulted in a decrease in the air velocity through the clothing material. The largest effects were found for clothing material with a low air resistance.		
16. DESCRIPTORS  Airflow                      Protection Flow                         Protective clotng Models Profiles		
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT  Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

Distributielijst \*

- 1 DWOO
- 2 HWO-KL
- 3\* HWO-KLu
- 4\* HWO-KM
- 5\* HWO-CO
- 6 LBBKL-KPU/GVG,  
G.M. Swenker
- 7 DM&P TNO-DO
- 8\* DM&P TNO-DO, accountcoördinator KL
- 9\* TNO-FEL, Bibliotheek
- 10/12 Bibliotheek KMA
- 13\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
BGen. Prof. J.M.J. Bosch
- 14\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. dr. U.A. Th. Brinkman
- 15 TNO-PML, Directie; daarna reserve
- 16 TNO-PML, Hoofd Divisie Toxische Stoffen  
Dr. ir. J. Medema
- 17 TNO-PML, Adjunct-hoofd Divisie Toxische Stoffen  
Dr. M.W. Leeuw
- 18/19 TNO-PML Divisie Toxische Stoffen, Groep Huidbescherming en Riosicoanalyse  
Dr. ir P. Brasser, Ir. J. Kaaijk
- 20 TNO-PML, Documentatie
- 21 TNO-PML, Archief

---

\* De met een asterisk (\*) gemerkte instanties/personen ontvangen uitsluitend de titelpagina, het managementuittreksel, de documentatiepagina en de distributielijst van het rapport.